

# 多平面光转换相干合成光场操控技术

周宏冰<sup>1)2)</sup> 陶汝茂<sup>1)†</sup> 闫玥芳<sup>1)</sup> 刘辰旭<sup>1)</sup> 冯曦<sup>1)</sup> 秦瑀<sup>1)</sup> 李敏<sup>1)</sup>  
许党朋<sup>1)</sup> 林宏奂<sup>1)</sup> 彭志涛<sup>1)</sup> 王建军<sup>1)</sup> 颜立新<sup>2)</sup> 景峰<sup>1)</sup>

1) (中国工程物理研究院, 激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

2) (清华大学工程物理系, 北京 100084)

(2025年11月12日收到; 2025年12月3日收到修改稿)

多平面光转换共孔径相干合成技术作为一种新兴的光场调控手段, 能够突破传统分孔径相干合成方法中能量利用率低与光束质量不佳的瓶颈. 本文建立了多平面光转换相干合成理论模型, 并引入了转换效率、旁瓣抑制比与相位匹配度等多维指标, 以全面评估光束质量. 提出了分区相位编码、涡旋相位编码等模式映射设计方法, 以提升输入输出模式间的匹配度. 该方法将5个多焦点光束的平均效率从92%提升至97%, 并显著改善光束质量. 通过数值仿真, 系统探索了多平面光转换在高效、灵活生成复杂结构光场方面的潜力. 结果表明, 多平面光转换相干合成可以生成多种复杂结构光场, 5个拉盖尔-高斯光束、5个几何图形和5个字母图案的平均效率分别为97.4%, 99.2%和96.5%, 旁瓣抑制比优于14 dB, 相位匹配度高于96%. 此外, 探讨了基于模式分解的任意光束整形方法的可行性及其对振幅调制的需求, 并分析了相位板数量与模式数量之间的制约关系. 本文研究证明了多平面光转换 (multi-plane light conversion, MPLC) 相干合成实现高能量利用率与高光束质量的光场操控的可行性, 有望为高功率结构光场在激光加工、量子信息等领域的应用提供理论依据和技术参考.

**关键词:** 多平面光转换, 相干合成, 光场操控

**DOI:** 10.7498/aps.75.20251549

**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251549

## 1 引言

光场操控是现代光学和光子学的核心技术之一, 可以生成复杂结构光场、实现从高能脉冲到单光子水平的精确控制, 在光成像、光通信、非线性光学、量子信息处理、激光加工等领域展现出巨大的科学与应用价值<sup>[1-8]</sup>. 相干合成 (coherent beam combining, CBC) 作为光场操控的重要技术途径之一, 通过对子光束的相位、振幅等参量进行主动控制, 可改变合成光场的时空特性分布. 因此, 该技术受到了广泛的研究关注<sup>[9-12]</sup>. 近年来, 分孔径相干合成技术取得了重大进展<sup>[13-15]</sup>, 合成输出功率迅速从20 kW提升到300 kW<sup>[16,17]</sup>、合成控制规

模超过千路<sup>[18]</sup>, 推动了分孔径相干合成光场操控技术发展. 分孔径相干合成避免了超表面片、空间光调制器等传统方法的低损伤阈值限制<sup>[19]</sup>, 可以产生高功率矢量光束, 目前已实现1.5 kW的矢量光束输出, 彰显了分孔径相干合成在高功率结构光场生成方面的优势和潜力<sup>[20-24]</sup>. 基于分孔径相干合成光场操控技术的高功率动态光束已推出120 kW产品, 在激光加工中得到应用验证, 显著提升了加工效率和成品质量<sup>[25,26]</sup>. 然而, 分孔径相干合成方案存在衍射旁瓣, 不仅会影响结构光场的质量<sup>[27,28]</sup>, 而且中心光束的能量利用率低于70%<sup>[29,30]</sup>, 限制了相干合成在高精度、高效率应用中的性能.

为了克服分孔径相干合成在能量利用率和光束质量上的局限性, Billaud等<sup>[31]</sup>提出利用多平面

† 通信作者. E-mail: [supertaozhi@163.com](mailto:supertaozhi@163.com)

光转换 (multi-plane light conversion, MPLC) 进行相干合成. MPLC 由多个相位板级联组成, 通过多级相位调制和自由空间传输, 精确控制光场在不同平面上的传播特性, 可以无损地实现任意正交光学变换, 理论能量利用率达 100%<sup>[32]</sup>. 2021 年, 法国航空航天实验室进行了 7 路 MPLC 相干合成的理论与实验验证, 合成效率约 72%,  $M^2 < 1.8$ <sup>[33]</sup>. 2023 年, Demur 等<sup>[34]</sup> 进一步实现了 12 路 MPLC 相干合成, 能产生 12 种厄米-高斯 (Hermite-Gaussian, HG) 模式并支持光束自偏转, 合成效率约 70%. MPLC 相干合成是一种可实现光场操控的共孔径相干合成技术, 有望克服分孔径相干合成能量利用率低、结构光场的质量需提升的问题, 而且 MPLC 技术凭借全反射和无损的特点, 已实验证明 MPLC 光束整形器能够处理高达 12 kW 的激光功率, 凸显了 MPLC 相干合成在高功率应用中的可行性<sup>[12,35]</sup>. 2022 年, Cailabs 公司在官网上推出了基于 MPLC 技术的 CANUNDA-USP 产品<sup>[36]</sup>, 在 1  $\mu\text{m}$  波段的脉冲能量可达 100  $\mu\text{J}$ 、平均功率可达 60 W, 可输出高斯、方形、圆形、线形等多种标准光斑形状, 但技术细节未知. 目前, 关于 MPLC 相干合成光场操控的研究工作仍然较少, 仅开展了 HG 光束产生以及小角度光束偏转等验证<sup>[34,37]</sup>, 尚未有其他特殊光场产生的研究报道, 导致 MPLC 相干合成光场操控的特性、潜力及受限因素并不清晰, 相关认识不够深入.

本文建立了 MPLC 相干合成光场操控的设计模型, 并开展了理论研究. 通过特殊相位编码的设计方式, 实现了可定制的结构光场操控. 同时, 通过构建包含转换效率、旁瓣抑制比与相位匹配度的

综合评价体系, 对比了不同相位编码方式对结构光场质量的影响, 并分析了其物理机制. 基于涡旋相位编码实现了多焦点光场、拉盖尔-高斯 (Laguerre-Gaussian, LG) 光场、定制结构光场的生成, 并探讨了基于正交模式分解的任意光束整形方法的潜力与局限. 此外, 研究了相位板数量对可支持模式数的影响. 本工作验证了 MPLC 相干合成光场操控在提升能量利用率和光束品质方面的可行性, 为相干合成光源的应用扩展提供了理论支撑.

## 2 理论模型

MPLC 相干合成系统如图 1 所示, 其核心部分为激光阵列和 MPLC 装置. 种子激光经分束器 (beam splitter, BS) 分为多路激光, 分别进入不同的放大器 (amplifiers) 链路, 放大至同等功率水平, 由准直器 (collimators, COs) 发射到空间中传输. 各路放大器之前均接入了一个相位调制器 (phase modulator, PM), 用于控制激光相位. 准直器按照特定形状紧密排列 (此处以常用的正六边形阵列为例), 相邻光束的间距相等、光轴平行, 从而沿着相同的方向传输.

### 2.1 激光阵列

激光阵列建模为理想条件下的基模高斯光束阵列, 表达式如下:

$$E_{\text{in}}(x, y) = \sum_{n=1}^N A_n e^{i\varphi_n} \exp \left[ -\frac{(x - x_n)^2 + (y - y_n)^2}{w_0^2} \right], \quad (1)$$

其中  $(x, y)$  代表横向空间坐标,  $(x_n, y_n)$  代表第

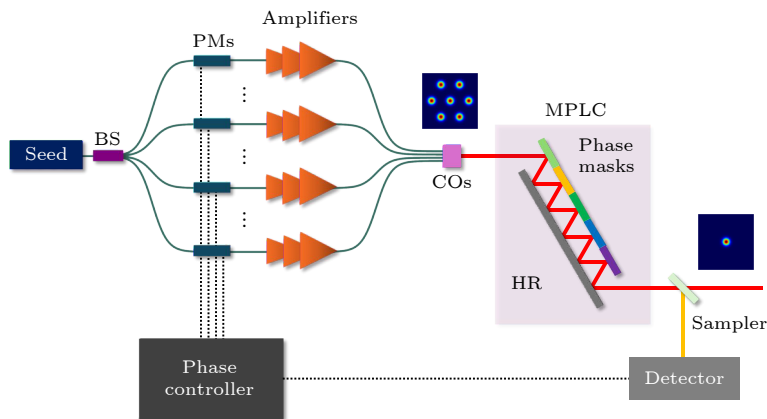


图 1 MPLC 相干合成系统结构

Fig. 1. Experimental setup of MPLC-based CBC system.

$n$  路激光的中心位置坐标,  $w_0$  代表束腰半径,  $A_n$ ,  $\varphi_n$  分别代表第  $n$  路激光的振幅、相位.

## 2.2 模式映射设计

MPLC 装置的基本物理结构如图 1 所示, 为等距排布的多个相位板. 由于 MPLC 执行正交光学变换, 需要指定一组正交的输入、输出模式, 形成多个模式的一一映射关系, 然后采用特定算法, 计算实现这种映射所需要的相位板图案. 因此, MPLC 相干合成光场操控, 核心在于模式映射设计和相位板设计.

为尽可能提高合成光束的能量利用率, 通常保持各路激光振幅不变, 但激光相位可以自由调控. 因此在设计模式映射关系时, 不同的输入模式应设计为不同相位编码的激光阵列 (各路激光具有不同的相位, 特定的阵列相位分布代表特定的相位编码), 而输出模式则是不同的特殊结构光束, 以满足光场操控的应用需求. 相位编码方式具有很高的设计自由度, 为了尽可能满足正交模式映射的要求, 本文提出了涡旋相位编码的方法, 具体实现方式如图 2 所示. 图 2(a) 代表不同级次的涡旋相位, 图 2(b) 和图 2(c) 分别代表对应级次涡旋相位编码后的输入、输出光场分布, 具有与图 2(a) 相同的涡旋相位, 形成一对映射关系. 利用不同级次的涡旋相位对多个输入、输出光场进行相位编码, 则定义了多个映射关系对, 即 MPLC 需要执行的光学变

换. 需要注意的是, 由于 PM 只能控制激光活塞相位, 因此在对输入阵列进行编码时, 仅采用了激光中心位置处的涡旋相位值 (离散分布), 各路激光仍保持平面波前; 而对输出模式进行编码时, 则采用了完整的涡旋相位 (连续变化).

## 2.3 相位板设计

指定输入、输出模式后, 没有方法可以直接计算 MPLC 的相位板分布, 需要采用逆向设计算法 [38]. 在多种设计算法中, 波前匹配法 [39] 由于具有简单、稳定、收敛快等优势得到广泛应用, 其算法步骤如表 1 所列. 基于经典的角谱传输法, 将输入模式逐级前向传输、输出模式逐级后向传输, 得到的各平面处前向、后向场分布, 计算前后向场的共轭乘积来确定相位板的更新方向 (当模式不止一个时, 需要对  $M$  个模式求和/求平均). 经过多步迭代更新后, 前向场和后向场逐渐趋于一致, 波前匹配完成, 得到了执行设计光学变换的 MPLC 相位板.

## 2.4 评价函数

为了定量评估合成光束性能, 引入耦合系数的评价指标, 并定义为转换效率  $\eta$ , 计算公式如下:

$$\eta = \frac{\left| \iint E_1^* E_2 dx dy \right|^2}{\iint |E_1|^2 dx dy \iint |E_2|^2 dx dy}, \quad (2)$$

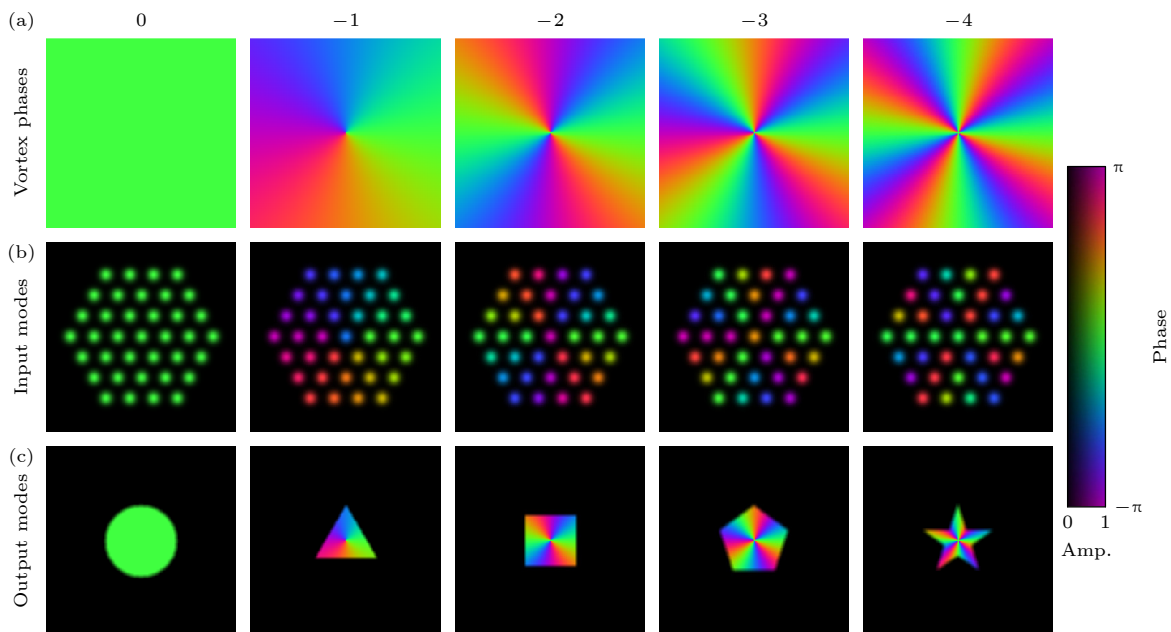


图 2 基于涡旋相位编码的 MPLC 模式映射设计方法

Fig. 2. Design method of MPLC mode mapping based on vortex phase coding.

表 1 基于波前匹配法的 MPLC 相位板设计步骤

Table 1. Procedure of MPLC phase mask design by wavefront matching.

需要参数: 模式数量( $M$ ), 相位板数量( $P$ ), 网格尺寸( $\delta$ ), 网格数量( $N$ ), 激光波长( $\lambda$ ), 相位板间距( $d$ )	
模场定义: 第 $p$ 个平面处的相位掩模版( $\Phi_p$ ), 第 $m$ 个输入模式的光场( $E_{in, m}$ ), 第 $m$ 个输出模式的光场( $E_{out, m}$ ), 第 $m$ 个输入模式正向传输到第 $p$ 个平面处的光场( $U_{p, m}$ ), 第 $m$ 个输出模式反向传输到第 $p$ 个平面处的光场( $V_{p, m}$ )	
1	相位掩模版初始化: $\Phi_p = \text{zeros}(N \times N)$ (for $p = 1$ to $P$ )
2	输入输出模式的光场初始化: $U_{1, m} = E_{in, m}$ , $V_{1, m} = E_{out, m}$ (for $m = 1$ to $M$ )
3	<b>for</b> $step = 1$ to 100 <b>do</b>
4	(通过前向传输更新相位掩模版)
5	<b>for</b> $p = 1$ to $P - 1$ <b>do</b> (对每个平面迭代)
6	<b>for</b> $m = 1$ to $M$ <b>do</b> (对每个模式迭代)
7	前向传输 $U_{p, m} \cdot \exp(i\Phi_p)$ , 获得 $U_{p+1, m}$
8	计算前后向重叠场 $O_{p+1, m} = (U_{p+1, m})^* \cdot V_{p+1, m}$
9	<b>end</b>
10	更新相位掩模版 $\Phi_{p+1} = -\arg(\sum_m O_{p+1, m})$
11	<b>end</b>
12	(通过反向传输更新相位掩模版)
13	<b>for</b> $p = P$ to 2 <b>do</b> (对每个平面迭代)
14	<b>for</b> $m = 1$ to $M$ <b>do</b> (对每个模式迭代)
15	反向传输 $V_{p, m} \cdot \exp(-i\Phi_p)$ , 获得 $V_{p-1, m}$
16	计算前后向重叠场 $O_{p-1, m} = (U_{p-1, m})^* \cdot V_{p-1, m}$
17	<b>end</b>
18	更新相位掩模版 $\Phi_{p-1} = -\arg(\sum_m O_{p-1, m})$
19	<b>end</b>
20	<b>end</b>

其中  $E_1$ ,  $E_2$  分别表示目标光场和实际获得光场, 通过重叠积分来计算二者的接近程度,  $\eta$  介于 0—1 之间,  $\eta$  越接近于 1 代表实际光场越接近目标分布, 获得的模式品质越高.

理论上, MPLC 相干合成具有无旁瓣的特性, 为了更直接地评价合成光束的品质, 引入旁瓣抑制比 (side-lobe suppression ratio, SSR) 的定义如下:

$$SSR = 10 \log_{10} \left( \frac{P_{\text{mainlobe}}}{P_{\text{sidelobe}}} \right). \quad (3)$$

可以看出, SSR 为对数单位 (dB) 下主瓣区域总功率 ( $P_{\text{mainlobe}}$ ) 与旁瓣区域总功率 ( $P_{\text{sidelobe}}$ ) 的比值, 从而直观展示光束旁瓣的强度. 本文中, 主瓣、旁瓣区域通过目标模式的模场分布确定, 其中主瓣区域定义为光束强度高于最大强度 1% 的区域, 剩余背景部分则定义为旁瓣区域. 在这种定义下, 可以计算标准基模高斯光的 SSR 为 20 dB.

除了上述两个评价指标外, 结构光场的相位分布也十分重要, 因此还需要进行相位匹配度 (phase

matching degree, PMD) 的评估, 计算公式如下:

$$PMD = \left| \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N e^{i[\phi_1(x_m, y_m) - \phi_2(x_m, y_m)]} \right|^2, \quad (4)$$

其中  $\phi_1$ ,  $\phi_2$  分别代表目标光场 ( $E_1$ ) 和实际获得光场 ( $E_2$ ) 的相位,  $N$  代表计算用到的网格点数,  $m$  表示第  $m$  个网格点, 对应的空间坐标为  $(x_m, y_m)$ . 由于背景旁瓣区域几乎没有能量分布, 相位匹配与否并无实质影响, 因此将  $N$  定义为主瓣区域的网格点数, 不同光斑的  $N$  各不相同. (4) 式采用复数值计算的方式, 不仅同时利用了相位的正弦、余弦信息, 而且当二者相位分布相差一个常数 (活塞相位) 时, 不会影响计算结果. PMD 可以准确表征输出光场的相位分布与目标相位分布的匹配程度, PMD 越接近 1, 表示相位分布匹配越好.

需要说明的是, 尽管  $M^2$  因子是常用的光束质量评价指标, 但并未在本文中采用.  $M^2$  因子的物理本质是描述实际光束与理想高斯光束的偏离程度, 然而本文结构光场的设计目标并非追求高斯形态,

而是实现特定的空间分布. 因此, 对于形态各异的光斑, 其  $M^2$  因子本身即存在较大差异, 这不仅使得该指标在评估此类定制光场时意义有限, 也不便于在不同光斑之间进行直接对比. 相比之下, 本节定义的  $\eta$ , SSR 和 PMD 等指标能直接、定量地反映实际光场与目标光场在强度分布和相位分布上的匹配程度, 从而全面评估结构光场的生成质量.

### 3 数值仿真结果

为验证理论模型及相位编码方法的有效性, 开展了系统的数值仿真研究. 仿真中激光阵列采用正六边形排布, 构建了 37 路 MPLC 相干合成系统, 主要的激光参数和 MPLC 参数如表 2 所列: 激光中心波长  $1 \mu\text{m}$ , 束腰半径为  $0.5 \text{ mm}$ , 相邻光束排

列间距为  $2 \text{ mm}$ ; MPLC 的相位板数量为 9 个及以上 (图 3 中为 9 个, 图 4—图 6 中为 10 个, 其余图的相位板数量在正文中有相应描述), 相邻相位板间距  $0.5 \text{ m}$ , 相位板的最小分辨率 (仿真中的网格尺寸) 为  $100 \mu\text{m}$ , 网格数量为 512. 通过定量评估效率等关键指标, 本节将重点分析不同相位编码策略对合成光场质量的影响, 并进一步探究 MPLC 生成特定结构、任意结构光场的性能与潜力.

表 2 MPLC 相干合成仿真参数  
Table 2. Parameters of MPLC-based CBC in simulation.

参数名	数值	参数名	数值
光束数量	37	相位板数量	$\geq 9$
光束腰斑半径/mm	0.5	相位板间距/m	0.5
光束间距/mm	2	网格尺寸/ $\mu\text{m}$	100
激光波长/ $\mu\text{m}$	1	网格数量	512

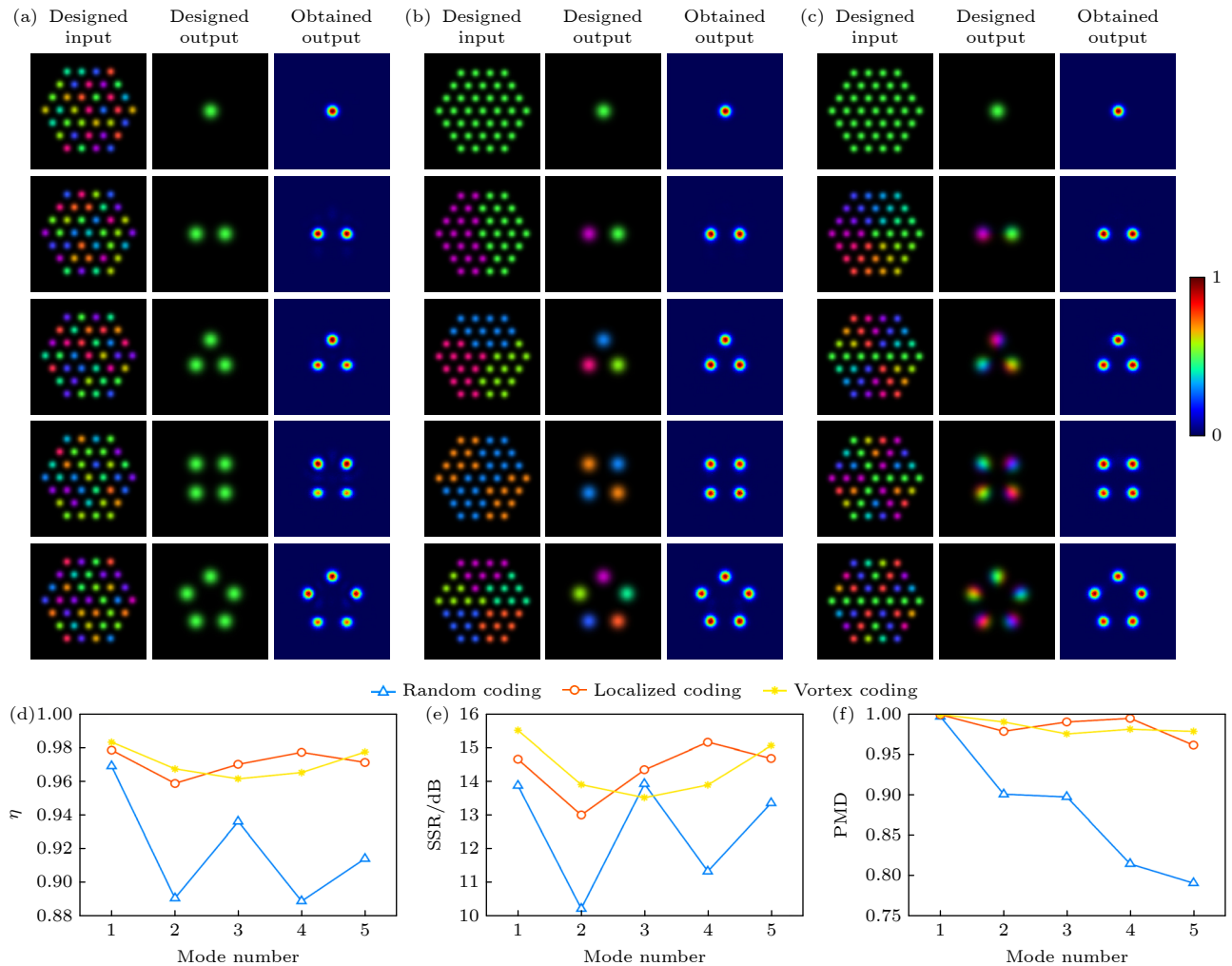


图 3 不同编码方式的多焦点光束生成结果 (a) 随机编码; (b) 分区编码; (c) 涡旋编码. 不同编码下每个模式质量评估 (d)  $\eta$ ; (e) SSR; (f) PMD

Fig. 3. Results of multi-focus beam by various coding methods: (a) Random coding; (b) localized coding; (c) vortex coding. Beam evaluation of each mode under different coding: (d)  $\eta$ ; (e) SSR; (f) PMD.

### 3.1 相位编码方式的影响

模式映射设计是实现 MPLC 相干合成光场操控的重要步骤, 但不同的映射方式对于 MPLC 性能的影响尚不清晰, 为此开展了对比研究. 以多焦点光斑为例, 设计了 1 至 5 个焦点光束, 采用了随机相位、分区相位、涡旋相位的三种不同编码方式, 进行 MPLC 相干合成仿真. 三种编码方式如图 2 所示, 其中涡旋相位编码已在 2.2 节中介绍. 随机相位编码如图 3(a) 所示, 输出模式中多个焦点均设置为 0 相位, 而输入模式中的激光相位随机分布. 分区相位编码如图 3(b) 所示, 将不同焦点赋予不同的活塞相位, 并满足相邻焦点之间相位差相等的对称性要求, 然后将激光阵列根据焦点数量、位置进行分区, 不同区域的激光相位设置为与对应焦点相位相同. 三种不同编码方式的仿真结果如图 3 所示, 其中图 3(a)—(c) 的第三行代表 MPLC 实际输出模式的强度图像, 可以看出图 3(a) 中的 2—5 个焦点光斑质量略低于图 3(b) 和图 3(c), 强度分布不均匀, 并且存在背景杂散光. 图 3(d) 给出了不同编码方式中 5 个模式的转换效率 ( $\eta$ ), 可以更清晰地看出随机编码方式的效率明显偏低, 5 个模式的效率依次为 96.9%, 89.1%, 93.6%, 88.9% 和 91.4%, 平均效率约 92.0%. 相比之下, 分区、涡旋编码获得的每个模式效率均优于随机编码, 其中分区编码下 5 个模式的效率分别为 97.8%, 95.9%, 97.0%, 97.7% 和 97.1%, 平均效率约 97.1%; 涡旋编码下 5 个模式的效率为 98.3%, 96.7%, 96.1%, 96.5% 和 97.7%, 平均效率同样约为 97.1%, 说明分区、涡旋编码效果接近.

为了更全面地评估光束质量, 我们进一步计算了旁瓣抑制比 (SSR) 和相位匹配度 (PMD), 结果分别如图 3(e) 和图 3(f) 所示. SSR 曲线与图 3(d) 中的  $\eta$  曲线呈现出相近的趋势, 不同编码方式、不同模式的 SSR 均在 10—16 dB 范围内, 说明 MPLC 相干合成无明显旁瓣. 然而, 随机编码相较于分区编码和涡旋编码, 合成光束整体表现出更低的 SSR 值 (3 焦点光束除外). 经计算, 三种编码方式的模式平均 SSR 分别为 12.5, 14.4 和 14.4 dB, 说明另外两种编码方式能够进一步抑制旁瓣. 图 3(f) 的 PMD 结果进一步展现了不同编码方式之间的差别. 随机编码中, 5 个模式的 PMD 依次为 99.7%, 90.1%, 89.7%, 81.5% 和 79.1%, 随着焦

点数量的增多, 相位匹配度逐渐下降, 模式平均 PMD 约为 88.0%. 反观另外两种编码方式, PMD 均高于 96%, 未出现与焦点数量相关联的下降趋势, 计算得到二者的模式平均 PMD 均约为 98.5%, 比随机编码高出了 10 个百分点, 说明了优化编码方式能够明显提升合成光场与目标光场之间的相位分布匹配度, 获得更优质的光斑.

上述性能差异的物理根源在于相位编码方式导致的模场匹配度不同. 随机相位编码引入不连续、无规则的相位分布, 与输出目标光场的连续、规则相位分布匹配度极低. 按照 PMD 计算 (4) 式, 将计算区域选择为输入阵列与目标光场的重叠部分, 可得到随机相位编码下输入输出模式之间的平均相位匹配度仅为 15.5%, 而分区编码和涡旋编码的平均相位匹配度分别为 95.0% 和 87.4%. 随机相位编码中的严重模场失配使得 MPLC 装置难以通过有限数量的相位板实现高效、精确的模场变换, 导致部分能量无法耦合到目标模式中, 从而表现为转换效率较低、旁瓣抑制比差 (SSR 值低) 以及实际输出相位与目标相位的偏差较大 (PMD 值低). 相比之下, 分区编码和涡旋编码均通过引入规则、连续的相位调制, 使得输入激光阵列的相位分布与目标光场的相位结构高度相似, 极大提升了模场匹配度, 为 MPLC 的模式变换提供了良好的基础, 使其在同等条件下能够实现更高质量的光场操控.

以上分析表明, MPLC 具有良好的鲁棒性, 即使在随机映射关系下, 也能产生特征清晰的目标模式. 然而, 编码方式直接影响模场匹配度, 进而决定了光场操控的最终性能. 当输入、输出模式之间具有相近的模场分布特征时, 系统能够实现更高的转换效率、更好的旁瓣抑制和更精准的相位复现. 尽管分区、涡旋编码效果接近, 但对于特殊形状光斑, 不一定能找到合适的分区方式, 而涡旋编码更加简单、通用, 因此在后续仿真中主要采用涡旋相位编码.

### 3.2 LG 光束产生

作为标准正交光束, LG 光束和 HG 光束在经典光学和量子光学领域具有广泛应用<sup>[40–43]</sup>, 二者均为 Fourier 变换的本征函数、傍轴波动方程的解以及渐变折射率波导和量子谐波振荡器的特征模式. 基于 MPLC 相干合成产生不同阶次 HG 光束

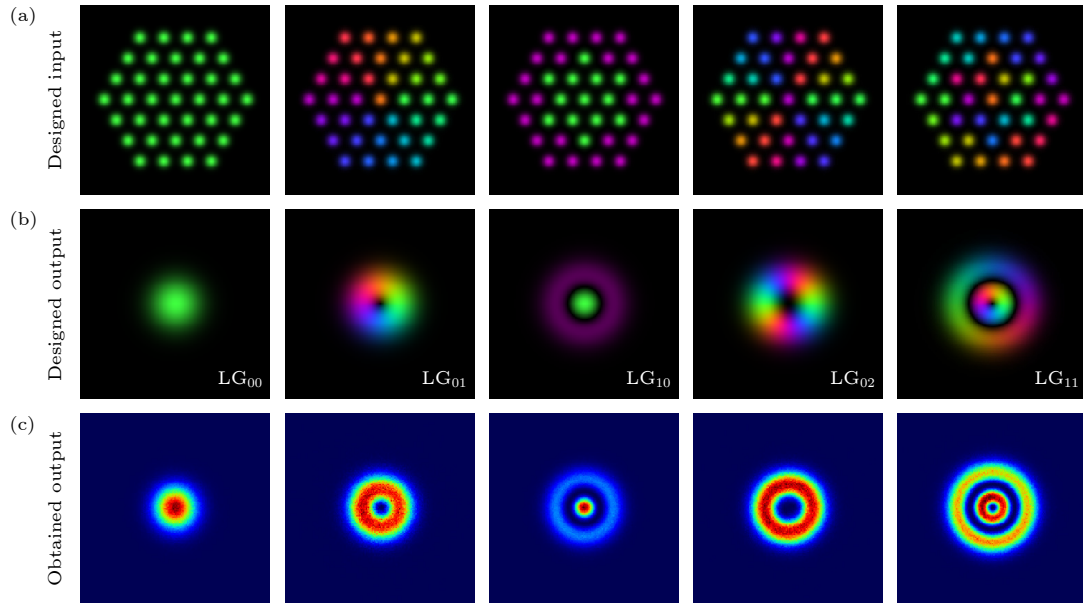


图4 MPLC 相干合成产生不同阶次 LG 光束 (a) 设计输入; (b) 设计输出; (c) 实际输出

Fig. 4. LG beam generation by MPLC-based CBC: (a) Designed input; (b) designed output; (c) obtained output.

已得到验证<sup>[34]</sup>, 而合成 LG 光束的研究较少.  $LG_{\rho l}$  光束的复振幅分布如图 4(b) 所示, 其中  $\rho$  为径向指数 (沿径向分为  $\rho+1$  个亮环),  $l$  为角向指数 (代表涡旋相位级次或拓扑荷), 并且相邻环之间的相位差为  $\pi$ . 为了适应 LG 光束的分布特征, 在设计 MPLC 映射关系时需要结合 3.1 节中分区编码、涡旋编码的特点: 如图 4(a) 所示, 对于  $LG_{\rho l}$  光束, 首先根据亮环数量将激光阵列沿径向分为  $\rho+1$  个区域, 分别对每个区域赋予级次  $l$  的涡旋相位, 使得输入阵列的分布与目标 LG 模式尽可能接近. 基于上述映射关系, 设计的 MPLC 输出模式强度如图 4(c) 所示, 获得了高质量的 LG 光束. 输出光束的定量评估结果如表 3 所列,  $LG_{00}$ ,  $LG_{01}$ ,  $LG_{10}$ ,  $LG_{02}$  和  $LG_{11}$  的效率分别为 96.3%, 97.2%, 97.7%, 99.3% 和 96.5%, 平均效率约 97.4%. 同时, 这些 LG 光束展现出优异的旁瓣抑制性能, SSR 介于 14.0 至 21.0 dB 之间 (平均值 17.6 dB); PMD 均高于 96% (平均值 98.5%), 表明其相位分布与目标高度吻合.

 表3 基于 MPLC 相干合成的 LG 光束生成质量评估  
 Table 3. Evaluation of LG beam generation in MPLC-based CBC.

模式	$LG_{00}$	$LG_{01}$	$LG_{10}$	$LG_{02}$	$LG_{11}$
$\eta/\%$	96.3	97.2	97.7	99.3	96.5
SSR/dB	14.0	17.4	16.6	21.0	18.9
PMD/%	99.4	98.8	98.8	99.4	96.2

### 3.3 任意光束产生

MPLC 相干合成的输出模式可以根据需要设计, 使得高效产生特殊光斑成为可能. 根据应用需要, 设计好光斑强度分布之后, 其相位分布仍可以调控. 由于相位分布通常为连续的, 因此我们采用 2.2 节定义涡旋相位编码的方式, 对输入阵列、输出模式进行相同级次的涡旋相位编码, 形成一一映射关系. 首先定义了圆形、三角形、正方形、五边形、五角星等 5 种几何形状的光束, 输入输出映射关系如图 5(a) 和图 5(b) 所示, 设计得到的 MPLC 输出模式强度如图 5(c) 所示, 形状与设计几乎完全相同. 如表 4 所列, 5 个形状光束的效率依次为 99.5%, 98.8%, 99.1%, 99.2% 和 99.2%, 平均效率约 99.2%, 并且 SSR 均优于 21.0 dB (平均值 22.6 dB), PMD 均高于 99.5% (平均值 99.7%), 展现了 MPLC 产生高质量定制光场的可行性.

表4 基于 MPLC 相干合成的定制形状光束生成质量评估

Table 4. Evaluation of customized-shape beam generation in MPLC-based CBC.

模式	圆形	三角形	正方形	五边形	五角星
$\eta/\%$	99.5	98.8	99.1	99.2	99.2
SSR/dB	25.3	21.0	21.9	22.5	22.2
PMD/%	99.9	99.6	99.9	99.8	99.5

进一步, 将输出模式设计为更加复杂的字母形状 (L, A, S, E, R), 仍采用涡旋相位编码方式, 映射

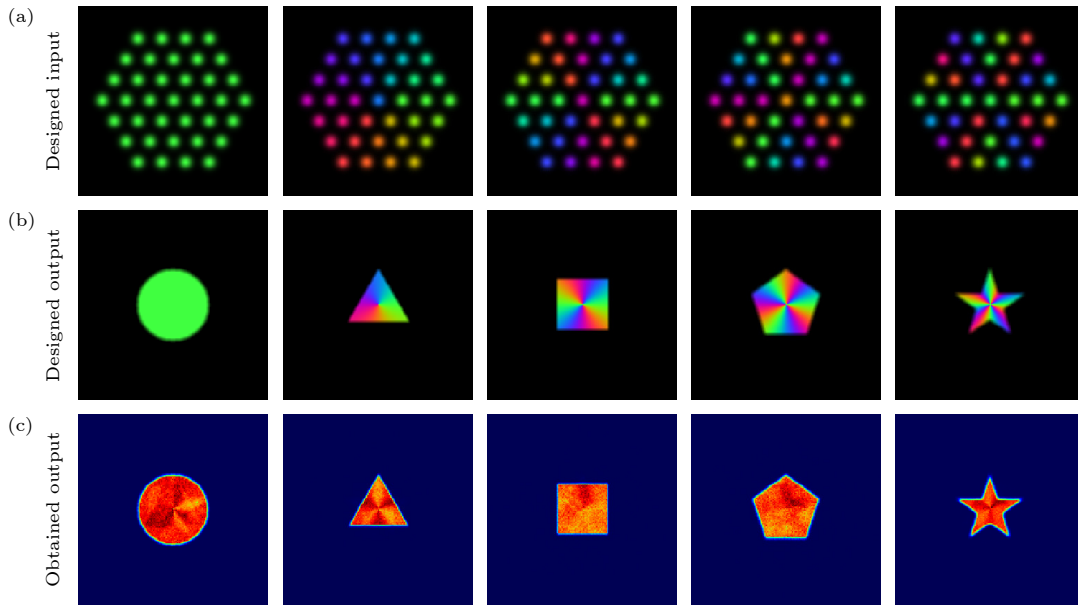


图 5 MPLC 相干合成产生定制形状光束 (a) 设计输入; (b) 设计输出; (c) 实际输出

Fig. 5. Customized-shape beam generation by MPLC-based CBC: (a) Designed input; (b) designed output; (c) obtained output.

关系如图 6(a) 和图 6(b) 所示, 得到的 MPLC 输出模式强度如图 6(c) 所示, 获得了 5 个清晰准确的字母光斑. 其光束质量评估数据汇总于表 5, 效率分别为 94.5%, 97.8%, 96.3%, 96.2% 和 97.9%, 平均效率约 96.5%. 尽管形状更加复杂, 输出光束的 SSR 仍保持在 14.8 dB 以上 (平均值 17.2 dB), PMD 均高于 93% (平均值 96.9%), 再次展现了 MPLC 光场操控的巨大潜能.

表 5 基于 MPLC 相干合成的字母形状光束生成质量评估

Table 5. Evaluation of letter-shape beam generation in MPLC-based CBC.

模式	字母 L	字母 A	字母 S	字母 E	字母 R
$\eta/\%$	94.5	97.8	96.3	96.2	97.9
SSR/dB	14.8	17.3	16.6	18.3	18.9
PMD/%	93.1	98.6	96.6	98.3	97.7

根据线性代数的基本理论可知, 任意形状的光场可以分解为一组正交基底的线性组合. 在完备的无穷维空间中, 这种分解是精确的. 通常低阶模式的贡献更高, 高阶模式贡献逐渐减小, 因此在有限个模式的约束下, 这种分解仍然是有效的, 分解光场可以很好地逼近目标光场. 由于 MPLC 执行线性光学变换, 为了获得一组输出模式的线性组合, 只需要按照相同的权重系数, 对输入模式进行线性

组合. 值得注意的是, MPLC 输入模式是不同相位编码的同振幅激光阵列, 若将这些输入模式线性组合产生新的输入模式, 则无法保证组合后各路激光振幅仍相等. 仿真实现了 21 个 LG 模式的 MPLC, 来验证有限个模式数量下实现任意光场操控的可行性. MPLC 采用了 30 个平面, 获得的 21 个 LG 模式如图 7(a) 所示, 平均效率约为 95%. 目标模式设置为图 5 中定义过的一些基本形状 (三角形、正方形、五边形、五角星). 首先, 以理想的 (效率 100%) LG 模式作为基底, 对目标模式进行数值分解, 在基底模式数量为 21 的限制下, 分解的结果如图 7(b) 的第二列, 光斑轮廓与目标模式基本接近, 但内部强度分布并不均匀. 然后, 利用 21 模式的 MPLC 进行模式分解, 得到的结果显示在图 7(b) 的第三列, 与第二列的结果很接近, 说明了 MPLC 实现任意光束整形的可行性, 光束品质略有退化的原因在于基底 (LG) 模式的效率为 95%, 降低了模式分解精度. 图 7(b) 第四列给出了 MPLC 产生这样特殊形状光斑所需要的输入阵列复振幅分布, 与前文的分析相符, 表明支持多个 LG 模式 (或其他正交基底) 的 MPLC, 能够通过调制激光阵列的振幅、相位联合调制实现任意光束整形, 整形效果主要取决于 MPLC 输出基底的品质和数量.

然而, 这种灵活性伴随着对输入阵列进行非均匀强振幅调制的需求. 对于图 7 中展示的几种形

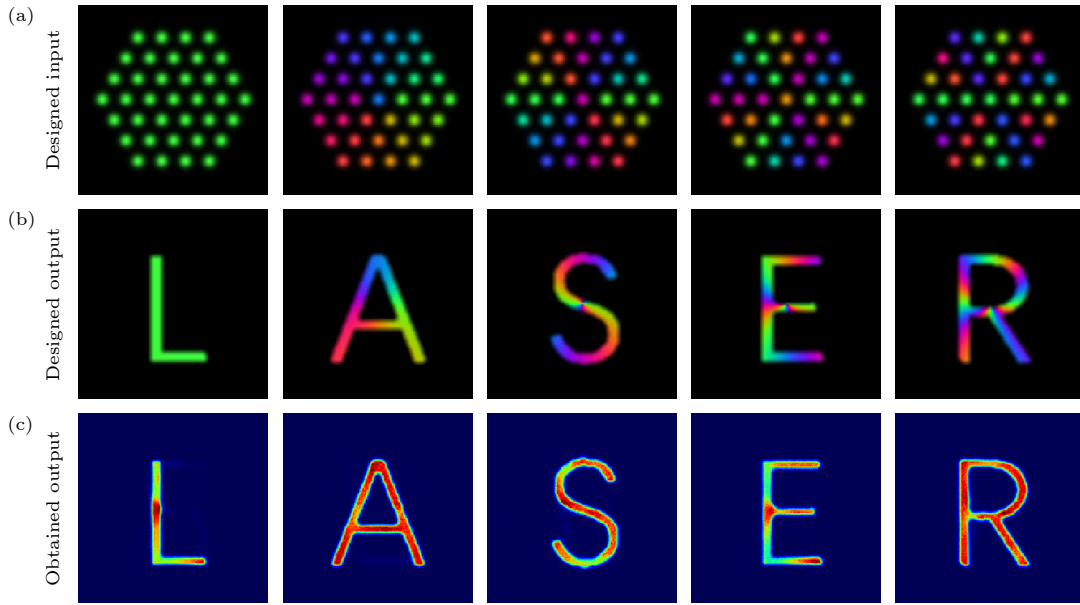


图 6 MPLC 相干合成产生字母形状光束 (a) 设计输入; (b) 设计输出; (c) 实际输出

Fig. 6. Letter-shape beam generation by MPLC-based CBC: (a) Designed input; (b) designed output; (c) obtained output.

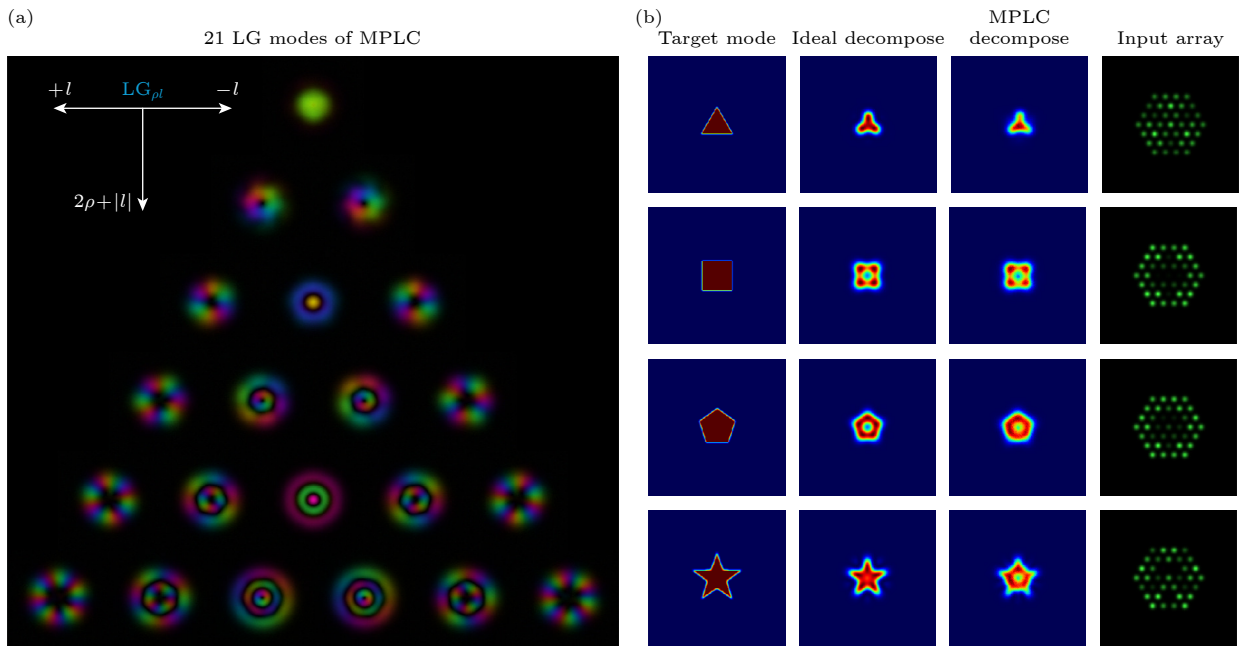


图 7 (a) MPLC 产生的 21 个 LG 模式; (b) 基于 LG 模式分解的 MPLC 光场操控

Fig. 7. (a) 21 LG modes generated by MPLC; (b) optical field manipulation of MPLC based on LG mode decomposition.

状, 激光阵列振幅的相对标准偏差 (标准偏差与平均值之比) 分别为 0.42, 0.35, 0.52, 0.46 和 0.53, 最小振幅与最大振幅的比值分别为 0.18, 0.21, 0.03, 0.10 和 0.01. 这意味着部分通道的振幅需调至极低水平, 导致系统的整体功率输出水平相比于常规相干合成显著降低. 同时, 这也对激光阵列的工程实现提出了严峻挑战: 每个通道不仅需要相位调制器, 还需要独立的振幅调制能力, 增加了系统

的复杂性和成本. 因此, 基于模式分解的任意光束整形方法虽然提供了极高的设计自由度, 但代价是输出功率的下降和系统复杂度的提升. 该方法更适用于对光场形状灵活性要求极高、而对能量效率要求较低的场景, 例如低功率的量子信息处理或光学微操纵. 对于高功率激光加工等追求高能量利用率的应用, 则更适合采用前文所述纯相位调制方法, 实现高效率的定制光场生成.

## 4 讨论

尽管前文已实现了高质量、高效率的 MPLC 光场操控, 但可定制的结构光场数量有限, 限制了 MPLC 相干合成光源的应用, 需要进一步探索模式提升的可能性. 以标准的 LG 模式生成为例, 首先保持 MPLC 的所有参数不变 (平面数为 10), 增加设计模式数量, 利用波前匹配法重新设计相应的 MPLC, 获得的转换效率如图 8(a) 所示. 可以明显地看到, 参数不变时, 效率与模式数量成反比, 到 28 个 LG 模式时, 效率已经跌至 70%. 为了提升效率, 采用了增加平面数的方案, 计算了不同模式数量情况下, 达到不低于 90% 效率所需要的平面数, 结果如图 8(b) 所示, 表明模式数量越多, 在其他参数不变的情况下, 需要的平面数也越多, 28 个模式需要至少 36 个相位板.

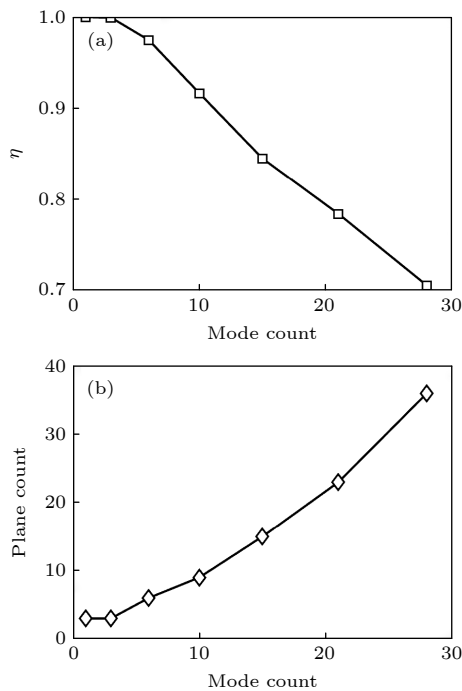


图 8 (a) 平面数不变时  $\eta$  与模式数的关系; (b) 不同模式数量下  $\eta > 90\%$  所需平面数

Fig. 8. (a)  $\eta$  versus mode count with constant plane count; (b) plane count required to achieve  $\eta > 90\%$  for different mode count.

这一现象背后的物理机制主要源于模式变换所需的自由度与调控维度. MPLC 本质上是一个通过多个平面上的离散相位调制, 来逼近连续目标波前变换的系统, 每个相位板提供了一定的相

位调控自由度. 当需要实现的模式数量 (即变换的维度) 增加时, 输入与输出模式集合之间的映射关系更为复杂, 需要更高维度的波前操控才能保证所有模式同时实现高效转换. 增加相位板数量, 相当于增加了系统可用的调控自由度, 在光场传播过程中进行更多次的精确校正, 从而补偿因模式间串扰和衍射效应引起的能量耦合损失, 提升转换效率. 然而, 过多的相位板不仅使 MPLC 结构变得庞大复杂, 而且在实际工程中, 各平面的微小误差与损耗经过多层累积后, 将产生显著影响, 最终造成效率下降并限制 MPLC 的应用. 因此, 在少平面的限制下, 实现更多数量的模式生成仍然充满挑战, 需要同时优化其他系统参数、设计更高效的模式映射关系等.

## 5 结论

本文构建了多平面光转换相干合成光场操控理论模型, 通过引入分区相位、涡旋相位编码方法, 显著提升了输入输出模场间的相位匹配度, 改善了输出光束质量. 结果表明, MPLC 相干合成可实现多焦点、LG 光束及复杂定制光场的高质量生成 (平均转换效率  $> 97\%$ , 旁瓣抑制比优于 14 dB, 相位匹配度高于 96%), 具备良好的鲁棒性与灵活性. 此外, 提出并验证了基于正交模式分解的 MPLC 任意光束整形方法, 有望实现动态、可重构的光场调控, 然而强振幅调制带来了输出功率降低等问题. 研究还表明, 增加相位板数量可支持更多模式的高效转换, 其背后物理机制在于提供更高的波前调控自由度以应对复杂映射, 但也面临工程实现的挑战, 需要进一步优化设计来减少所需的相位板数量. 本工作不仅深化了对 MPLC 相干合成机制的理解, 也为高功率结构光束在激光加工、量子光学等领域的应用拓展提供了重要参考.

## 参考文献

- [1] Forbes A, Oliveira M D, Dennis M R 2021 *Nat. Photonics* **15** 253
- [2] He C, Shen Y J, Forbes A 2022 *Light Sci. Appl.* **11** 205
- [3] Barati Sedeh H, Litchinitser N M 2023 *Nanophotonics* **12** 2687
- [4] Yang Y Q, Forbes A, Cao L C 2023 *Opto-Electron. Sci.* **2** 230026
- [5] Zeng Y X, Sha X B, Zhang C, Zhang Y, Deng H C, Lu H P, Qu G Y, Xiao S M, Yu S H, Kivshar Y, Song Q H 2025

*Nature* **643** 1240

- [6] Li Z C, Liu W W, Zhang Y B, Cheng H, Zhang S, Chen S Q *2024 Photonix* **5** 30
- [7] Zhang Z, Wang Y, Zhang L, Yang H, Zhao S, Pan X, He W, Ma Y, Kong L, Xiao L, Zhao C *2025 Nat. Commun.* **16** 7857
- [8] Zhou S, Li L, Gao L, Zhou Z, Yang J, Zhang S, Wang T, Gao C, Fu S *2025 Light Sci. Appl.* **14** 167
- [9] Lin D, Carpenter J, Feng Y T, Jain S, Jung Y M, Feng Y J, Zervas M N, Richardson D J *2020 Nat. Commun.* **11** 3986
- [10] Eyal S, Yaniv V, Benayahu U *Proceedings of Fiber Lasers XVII: Technology and Systems* California, United States, February 1–6, 2020 p1126021
- [11] Prossotowicz M, Flamm D, Heimes A, Jansen F, Otto H J, Budnicki A, Killi A, Morgner U *2021 Opt. Lett.* **46** 1660
- [12] Zhou H B, Yan Y F, Liu C X, Feng X, Qin Y, Li M, Tao R M, Lin H H, Peng Z T, Wang J J, Yan L X, Jing F *2025 High Power Laser Sci. Eng. (accepted)*
- [13] Zhou H B, Zhang H Y, Li M, Feng X, Xie L H, Liu Y, Chu Q H, Yan Y F, Tao R M, Lin H H, Wang J J, Yan L X, Jing F *2024 High Power Laser Part. Beams* **36** 061001 (in Chinese) [周宏冰, 张昊宇, 李敏, 冯曦, 谢亮华, 刘珂, 楚秋慧, 闫玥芳, 陶汝茂, 林宏旻, 王建军, 颜立新, 景峰 *2024 强激光与粒子束* **36** 061001]
- [14] Zhou P, Chang H X, Su R T, Wang X L, Ma Y X *2024 Chin. J. Lasers* **51** 0121002 (in Chinese) [周朴, 常洪祥, 粟荣涛, 王小林, 马阎星 *2024 中国激光* **51** 0121002]
- [15] Li C, Zhang J Y, Ren B, Chang H X, Wang T, Guo K, Zhang Y Q, Su R T, Leng J Y, Xu J M, Wu J, Zhou P *2024 Chin. J. Lasers* **51** 1901006 (in Chinese) [李灿, 张嘉怡, 任博, 常洪祥, 王涛, 郭琨, 张雨秋, 粟荣涛, 冷进勇, 许将明, 吴坚, 周朴 *2024 中国激光* **51** 1901006]
- [16] Wu J, Ma Y X, Ma P F, Su R T, Li C, Jiang M, Chang H X, Ren S, Chang Q, Wang T, Ren B, Zhou P *2021 Infrared Laser Eng.* **50** 20210621 (in Chinese) [吴坚, 马阎星, 马鹏飞, 粟荣涛, 李灿, 姜曼, 常洪祥, 任帅, 常琦, 王涛, 任博, 周朴 *2021 红外与激光工程* **50** 20210621]
- [17] Karr T, Trebes J *2024 Phys. Today* **77** 32
- [18] Chang Q, Gao Z Q, Deng Y, Ren S, Ma P F, Su R T, Ma Y X, Zhou P *2023 Chin. J. Lasers* **50** 0616001 (in Chinese) [常琦, 高志强, 邓宇, 任帅, 马鹏飞, 粟荣涛, 马阎星, 周朴 *2023 中国激光* **50** 0616001]
- [19] Li H K, Xie L H, Zhang C, Tao R M, Shu Q, Li M, Shen B J, Feng X, Xu L X, Wang J J *2023 Front. Phys.* **11** 1195655
- [20] Zhi D, Hou T Y, Ma P F, Ma Y X, Zhou P, Tao R M, Wang X L, Si L *2019 High Power Laser Sci. Eng.* **7** e33
- [21] Long J H, Jin K K, Chen Q, Chang H X, Chang Q, Ma Y X, Wu J, Su R T, Ma P F, Zhou P *2023 Opt. Lett.* **48** 5021
- [22] Liu S X, Liu H, Qi X P, Peng W J, Feng Y J, Chen L, Li Z D, Sun Y H, Ma Y, Zhao Z G, Gao Q S, Liu Z J, Tang C *2023 Opt. Lett.* **48** 5121
- [23] Shu B W, Zhang Y Q, Nie Z Q, Tang S Q, Leng J Y, Zhou P *2025 Appl. Phys. Lett.* **126** 221101
- [24] Liu H Y, Li J, Jin K, Shu B W, Zhang Y Q, Nie Z Q, Wu J, Leng J Y, Zhou P *2025 Optica* **12** 1280
- [25] Asaf N, Nina A, Eyal S *2022 Proceedings of Fiber Lasers XIX: Technology and Systems* California, United States, January 22–February 28, 2022 p119810B
- [26] Weber R, Wagner J, Peter A, Hagenlocher C, Spira A, Urbach B, Shekel E, Vidne Y *2025 J. Manuf. Mater. Proc.* **9** 85
- [27] Zhang W, Jin K, Su R, Chang H, Ma Y, Jiang Z, Zhou P *2025 Opt. Express* **33** 35374
- [28] Jin K K, Chang H X, Long J H, Su R T, Zhang Y Q, Zhang J Y, Ma Y X, Zhou P *2024 Appl. Phys. Lett.* **125** 021108
- [29] Fsaifes I, Daniault L, Bellanger S, Veinhard M, Bourderionnet J, Larat C, Lallier E, Durand E, Brignon A, Chanteloup J C *2020 Opt. Express* **28** 20152
- [30] Klenke A, Jauregui C, Steinkopff A, Aleshire C, Limpert J *2022 Prog. Quantum. Electron.* **84** 100412
- [31] Billaud A, Gomez F, Allieux D, Laurechet N, Jian P, Pinel O, Labroille G *2019 Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS)* Oregon, United States, October 14–16, 2019
- [32] Morizur J F, Nicholls L, Jian P, Armstrong S, Treps N, Hage B, Hsu M, Bowen W, Janousek J, Bachor H A *2010 J. Opt. Soc. Am. A*: **27** 2524
- [33] Limery A, Lombard L, Bourdon P, Billaud A, Pinel O, Labroille G, Guennic T L, Jian P *2021 Proceedings of Technologies for Optical Countermeasures XVIII and High-Power Lasers: Technology and Systems, Platforms, Effects V* Online Only, September 3–18, 2021 p118670H
- [34] Demur R, Leviandier L, Turpin E, Bourderionnet J, Lallier E *2023 Opt. Express* **31** 32105
- [35] Garcia L, Pinel O, Jian P, Barré N, Jaffrès L, Morizur J F, Labroille G *2017 Proceedings of High-Power Laser Materials Processing-Applications, Diagnostics, and Systems VI* California, United States, January 31–February 2, 2017 p1009705
- [36] CANUNDA-USP PureBeam <https://www.cailabs.com/> [2022-3]
- [37] Zhou H B, Tao R M, Feng X, Qin Y, Yan Y F, Liu C X, Li M, Lin H H, Peng Z T, Wang J J, Yan L X, Jing F *2025 Chin. J. Lasers* **52** 1701007 (in Chinese) [周宏冰, 陶汝茂, 冯曦, 秦瑀, 闫玥芳, 刘辰旭, 李敏, 林宏旻, 彭志涛, 王建军, 颜立新, 景峰 *2025 中国激光* **52** 1701007]
- [38] Molesky S, Lin Z, Piggott A Y, Jin W, Vucković J, Rodriguez A W *2018 Nat. Photonics* **12** 659
- [39] Sakamaki Y, Saida T, Hashimoto T, Takahashi H *2007 J. Lightwave Technol.* **25** 3511
- [40] Schmiegelow C T, Schulz J, Kaufmann H, Ruster T, Poschinger U G, Schmidt-Kaler F *2016 Nat. Commun.* **7** 12998
- [41] Devlin R C, Ambrosio A, Rubin N A, Mueller J P B, Capasso F *2017 Science* **358** 896
- [42] Alonso M A, Dennis M R *2017 Optica* **4** 476
- [43] Lee J C T, Alexander S J, Kevan S D, Roy S, McMorran B J *2019 Nat. Photonics* **13** 205

# Multi-plane light conversion coherent beam combining for optical field manipulation

ZHOU Hongbing<sup>1)2)</sup> TAO Rumao<sup>1)†</sup> YAN Yuefang<sup>1)</sup> LIU Chenxu<sup>1)</sup>  
FENG Xi<sup>1)</sup> QIN Yu<sup>1)</sup> LI Min<sup>1)</sup> XU Dangpeng<sup>1)</sup> LIN Honghuan<sup>1)</sup>  
PENG Zhitao<sup>1)</sup> WANG Jianjun<sup>1)</sup> YAN Lixin<sup>2)</sup> JING Feng<sup>1)</sup>

1) (*Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*)

2) (*Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

( Received 12 November 2025; revised manuscript received 3 December 2025 )

## Abstract

Multi-plane light conversion (MPLC) coherent beam combining (CBC) offers a promising approach for flexible optical field manipulation, overcoming the limitations of low energy utilization and poor beam quality in traditional CBC methods. However, its potential for generating diverse structured beams and the underlying design principles remain underexplored. In this work, theoretical model of MPLC-based CBC system is constructed to perform numerical investigation into the property and capability of MPLC optical field manipulation. Localized phase coding and vortex phase coding methods are proposed for mode mapping design to enhance the match between input and output modes. By using multi-dimensional evaluation metrics such as conversion efficiency ( $\eta$ ), side-lobe suppression ratio (SSR), and phase matching degree (PMD), the performance of different coding strategies is systematically compared. The results show that although random coding yields an average efficiency of 92% for five multi-focus beams, both localized and vortex coding significantly improve output quality, achieving a superior average efficiency of 97.1%. Based on the proposed encoding methods, MPLC successfully produces 5 Laguerre-Gaussian (LG) beams, 5 geometric shapes, and 5 letter patterns with remarkably high average efficiencies, reaching 97.4%, 99.2%, and 96.5%, respectively, accompanied by high SSR ( $>14$  dB) and PMD ( $>96\%$ ). Furthermore, a strategy for arbitrary beam shaping by decomposing the target field into a linear combination of orthogonal modes is proposed and confirmed using a 21-mode MPLC. At the same time, its flexibility and the resulting need for strong amplitude modulation of the laser array are discussed. Finally, the relationship between the number of supported modes and the required number of phase plates is also analyzed, showing that maintaining high efficiency for a larger number of modes necessitates a significant increase in the number of phase plates. This study effectively generates a wide range of structured beams with minimal stray light and high energy utilization, demonstrating that MPLC-based CBC is a powerful and versatile technique for high-efficiency, high-quality optical field manipulation. Future work should focus on optimizing the design to reduce the required number of planes, thereby enabling practical applications in high-power laser processing, optical communication, and quantum optics.

**Keywords:** multi-plane light conversion, coherent beam combining, optical field manipulation

**DOI:** [10.7498/aps.75.20251549](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251549)

**CSTR:** [32037.14.aps.75.20251549](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251549)

† Corresponding author. E-mail: [supertaozhi@163.com](mailto:supertaozhi@163.com)

## 多平面光转换相干合成光场操控技术

周宏冰 陶汝茂 闫玥芳 刘辰旭 冯曦 秦瑀 李敏 许党朋 林宏奂 彭志涛 王建军 颜立新 景峰

## Multi-plane light conversion coherent beam combining for optical field manipulation

ZHOU Hongbing TAO Rumao YAN Yuefang LIU Chenxu FENG Xi QIN Yu LI Min XU Dangpeng  
LIN Honghuan PENG Zhitao WANG Jianjun YAN Lixin JING Feng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 050402 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251549

CSTR: 32037.14.aps.75.20251549

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251549>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

基于掺镱棒状光纤的高功率大能量四路相干合成飞秒激光系统

High-power high-energy four-channel fiber coherent beam combined system

物理学报. 2025, 74(1): 014205 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241476>

大气湍流对接收光场时间相干特性的影响

Influence of atmospheric turbulence on temporal coherence characteristics of received optical field

物理学报. 2022, 71(23): 234201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221202>

基于光学非互易的双路多信道全光操控

All-optical manipulation of two-way multi-channel based on optical nonreciprocity

物理学报. 2022, 71(18): 184202 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220506>

强非局域非线性介质中的扭曲部分相干涡旋光孤子特性

Characteristics of twisted partially coherent vortex solitons in strongly nonlocal nonlinear media

物理学报. 2026, 75(4): 184202 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251181>

超聚束压缩热态与压缩数态光场的高阶相干性

High-order coherence of super-bunching squeezed thermal states and squeezed number states of light fields

物理学报. 2025, 74(14): 144202 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250395>

室温表面电极离子阱中的多离子相干操控

Coherent manipulation of multiple ions in a room-temperature surface-electrode trap

物理学报. 2025, 74(24): 240301 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20251454>